



新能源技术应用系列

· 导读版 ·

实用光伏手册

原理与应用(上)

(原著第2版)

Practical Handbook of Photovoltaics
Fundamentals and Applications (Second Edition)

Augustin McEvoy
Tom Markvart
Luis Castañer



原版引进



科学出版社

新能源技术应用系列

Practical Handbook of Photovoltaics

Fundamentals and Applications

(Second Edition)

实用光伏手册

原理与应用（上）

（原著第2版）

Augustin McEvöy, Tom Markvart, Luis Castañer

科学出版社

北 京

图字：01-2012-4161 号

Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications (Second Edition)

by Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castañer

Copyright © 2012, Elsevier Inc. All rights reserved.

ISBN: 9780123859341

Authorized English language reprint edition published by the proprietor. Printed in China by Science Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书英文影印由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权科学出版社在中国大陆境内独家发行。本版仅限在中国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区以及台湾）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

实用光伏手册：原理与应用=Practical Handbook of Photovoltaics：
第2版．上：英文／（瑞士）麦克沃伊（McEvoy, A.）等著．—北京：
科学出版社，2013

（新能源技术应用系列）

ISBN 978-7-03-035577-5

I. ①实… II. ①麦… III. ①光电池—手册—英文 IV. ①TM914-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 220882 号

责任编辑：霍志国 / 责任印制：钱玉芬

封面设计：耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本：B5 (720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张：39 1/4

字数：788 000

定价：198.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）



导 读

自工业革命以来，随着生产力的飞速发展，世界范围的能源消费量大幅度增长。由于目前大量使用的煤、石油、天然气等化石燃料有可能在几十年以内枯竭，而且这些常规能源会带来严重的空气污染并加剧温室效应，因此，在 21 世纪发展清洁高效的新能源被摆在了重要的位置。而在新能源技术中，太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源，具有不消耗常规能源、无转动部件、寿命长、无噪声、无污染等优点。所以，光伏发电技术被认为是最有前景的领域之一。

太阳能光伏发电技术已有了 100 多年的历史。1839 年，法国物理学家 Edmond Becquerel 第一次发现了光生伏打效应：在光的照射下，一些材料会产生少量的电流。19 世纪 70 年代 Heinrich Hertz 第一次研究了 Se 中的光伏效应。20 世纪四五十年代，随着 Czochralski 法制备纯净的晶体硅技术的发展，光伏材料的商业应用开始起步。1954 年，贝尔实验室的科学家们用 Czochralski 法制得了第一个晶体硅光伏电池，它的转化效率达到了 4%。而在之后的数十年之间，伴随着半导体工业的巨大发展，太阳能光伏技术已发展成为一个极具潜力的产业。

2011 年，世界太阳能光伏发电新增安装量和累计安装量预计将分别达到 19GW 和 57GW。我国在世界太阳电池市场占有率，高达 40%，稳居第一位。2010 年，全世界产值排名前 10 位的太阳电池企业中，国内内资企业就占有前 5 名。目前我国太阳电池组件产能达到 21GW（有关权威部门宣称是 30GW），已成为名符其实的太阳电池生产大国。

图 1 是太阳电池按材料体系的分类。表 1 汇总了太阳电池的种类、转换效率和作为电力用途的现状等。

表 1 各种太阳电池材料的生产量、转换效率的现状 & 作为电力用途的展望

太阳电池材料	商用水平的 组件转换 效率/%	研究开发水 平的组件转 换效率/%	小面积电池的转 换效率（研发 开发阶段/%）	2007 年全世 界的产量** /MW	作为电力用途 对将来的展望
块体太阳电池					
1. 单晶硅	13~18	22.9 (778cm ²)*	25.0 (4cm ²)*	1355	到 2010 年，设备制造能力*** 达到 25GW
2. 多晶硅	13~15	15.5 (1.017cm ²)*	20.4 (1cm ²)*	1837	
3. GaInP/GaAs/ Ge 3 串结型	—		41.1 (0.05cm ²) 454 倍集光*	—	目前，主要由集光系统 配合使用

续表

太阳电池材料	商用水平的 组件转换 效率/%	研究开发水平 的组件转换 效率/%	小面积电池的转 换效率（研发 开发阶段/%）	2007 年全世 界的产量** /MW	作为电力用途 对将来的展望
薄膜太阳电池					
4. 非晶硅单结型	6~7	6~8	9.5 (1cm ²)*	168 (4 项 和 5 项的 合计)	到 2010 年, 设备制造能力 达到 4.8GW
5. 非晶硅/微晶硅 2 串结型	9~10	12~13	15.0 (1cm ²)*		
6. Cu (InGa) Se ₂	10~11	13~15 (900cm ²)	19.4 (1cm ²)*	40	到 2010 年, 设备制造能力 达到 1.3GW
7. CdTe	10~11	11~12 (10×120cm ²)	16.7 (1cm ²)*	219	2008 年仅 First Solar 就 生产 504MW。到 2010 年, 设备制 造 能 力 达 1GW
8. 色素增感	—	8.4 (17cm ²)*	10.4 (1cm ²)*	—	首先从民生用途开始
9. 有机半导体	—	2.05 (223cm ²)*	5.15 (1cm ²)	—	目前, 在转换效率、可 靠性方面还存在不少 问题

注 * 源于 Progress in Photovoltaic 刊物中以 Efficiency Table (转换效率表) 的形式发表的数据。

** 2008、2009、2010 年全世界的新增装机容量 (一般说来小于当年的产量) 分别是 5.95、7.37、15.7GW, 2011 年预计为 19.0GW。

*** 截至 2010 年, 我国太阳电池组件产能达到 21GW (有关权威部门宣传是 30GW)。

1. 硅系薄膜太阳电池

为促进太阳能光伏发电系统的普及, 需要大量的太阳电池, 为此要消耗大量作为太阳电池主原料的硅。现在, 占太阳电池市场八成以上的晶硅太阳电池, 由于使用厚度 200μm 以上的单晶或多晶硅片, 因此太阳电池价格的接近一半是材料费用。为将来大幅度地降低成本价格以及伴随需求扩大而确保材料供应, “省硅” 必将成为业界竞相奋斗的目标。

薄膜硅太阳电池的最大特征是, 作为吸收光的硅层的厚度与晶硅太阳电池的情况相比, 要薄得多 (仅为大约 1/100), 而且不是采用由硅锭切割成硅片, 而是在便宜的基板上, 在 1~2m² 的范围内, 做成薄而大面积的薄膜, 既节省资源, 生产效率又高。此外, 薄膜硅太阳电池与晶硅太阳电池相比, 转换效率与温度的

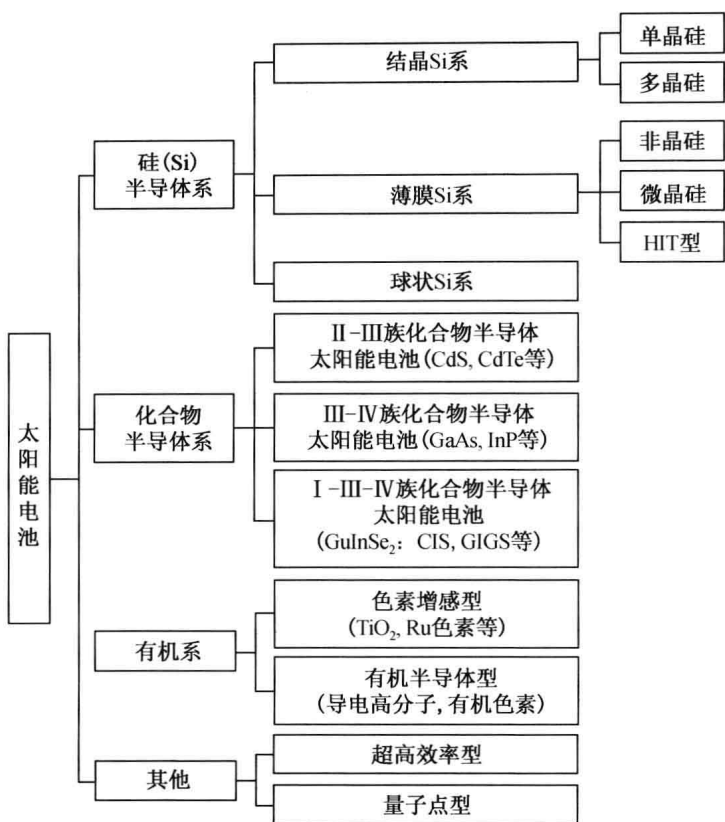


图1 太阳电池按材料体系的分类

相关性（温度系数）小，这对于温暖地区的发电还有优势。

但从另一方面讲，薄膜硅太阳电池的转换效率低，量产规模的仅为7%~10%，与晶硅太阳电池的转换效率相比，只有1/2左右。现在，薄膜硅太阳电池已经在对设置面积制约小的大规模太阳能发电站等导入，但为了扩大今后的市场份额，迫切要求其提高转换效率，降低发电价格。

对薄膜Si做大的分类可分为非晶Si（a-Si）和微晶Si（ $\mu\text{c-Si}$ ）两种（图2）。非晶硅的“非晶”有“非晶态”（amorphous）之意，由于与结晶Si的结构不同，尽管同属Si，但两种物质的性质却有很大的不同。首先，非晶硅的禁带宽度大约为1.7eV，比结晶Si的1.1eV要大得多。因此，非晶硅可吸收的光的波长限于约700 μm 以下，而且非晶Si还存在光致劣化的问题。所谓光致劣化，是指非晶硅太阳电池受光持续照射，由于缺陷增加致使电池转换效率下降的现象。通常，光致劣化引起的转换效率的下降可达初始值的两成左右，但经加热还会恢复到初始值。

微晶 Si 从结构上讲，是由非常小的结晶硅构成的。微晶 Si 的晶粒尺寸大致在 10~100nm，这与多晶 Si 的粒径相比，仅为 1/100 000。由于晶粒小，从而晶界大量存在，这些晶界会阻碍电荷的输运，而且成为由外部引入氧等杂质的原因。但是，藉由选择制作条件，可以获得晶界间隙少的致密微晶 Si，业已证明，这样的材料显示出优良的太阳电池特性。另一方面，其光学特性与结晶 Si 基本相同，吸收波长范围可达 1100nm 的近红外区域，而且微晶 Si 即使多少含有些非晶成分，也不显示光致劣化。

材料 (简记)	结构	粒径	能带间隙 (感度波长)	光照射 稳定性
非晶硅 (a-Si)	非晶态	—	~1.7eV ($\lambda \leq 700\text{nm}$)	×
微晶硅 ($\mu\text{c-Si}$)	晶态+非晶态 纤维状，柱状	10~100nm	~1.1eV ($\lambda \leq 1100\text{nm}$)	○
晶硅 (c-Si)	单晶，多晶	100mm~∞	~1.1eV ($\lambda \leq 1100\text{nm}$)	○

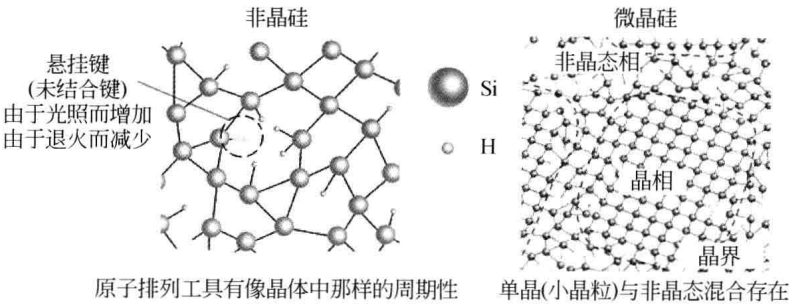


图 2 薄膜 Si 的种类、特征及晶体结构

薄膜 Si 太阳电池的性能，藉由多串结技术等成功运用，已得到明显改善。但从现状看，只能说已勉强追上市售多晶 Si 太阳电池的水平。今后，薄膜 Si 太阳电池要实现市场上的跃进，需要性能进一步提高，作为近期转换效率的目标，2 串结型要达到 15%，3 串结型要达到 18%。为此，抑制非晶 Si 光致劣化技术及更有效光封闭结构的开发，光吸收损失更小的 TCO 材料的开发，以及藉由新材料的开发改善红外吸收感度等课题可以说是堆积如山，既要求工艺、技术的创新，更要求材料的创新。

另一方面，伴随多串结化，由于太阳电池的层数、膜厚增加，从价格角度，估计对制膜速度的要求会越来越高。如果发电效率能进一步提高，而且藉由高速制膜技术能使生产成本进一步降低，则薄膜 Si 太阳电池就可以与结晶 Si 太阳电

池在市场上—争高下。期待薄膜太阳电池对世界太阳能发电系统的导入与普及做出更大的贡献。

2. CdTe 太阳电池

碲化镉 (CdTe) 太阳电池的转换效率高, 制作成本低, 近年来其产量急速上升, 在光伏的世界舞台上, 一跃成为引人注目的角色。

碲化镉 (CdTe) 太阳电池中 CdTe 光吸收层的禁带宽度为 1.5eV, 这是作为太阳电池最佳的禁带宽度。CdTe 的能带结构为直接跃迁型。与晶硅等间接跃迁半导体相比, 前者的光吸收系数要大得多。特别是便于实现薄膜化。因此, CdTe 太阳电池作为高效率、多晶薄膜太阳电池而备受期待, 而且高品质大面积的 CdTe 多晶薄膜可以由简易的工艺高速度地制作, 低价格的优势十分明显。其能量回收期 EPT (energy payback time, 抵消制造时耗能所需的运行时间) 小于 1 年 (晶硅电池在 1.5 年以上)。因此, 即使 CdTe 太阳电池使用镉 (Cd) 这种有害物质, 但从制造所需的能量考虑, 仍然被认为是对环境负担小的太阳电池。而且, Cd 是锌 (Zn) 等金属冶炼的副产品, 属于必然发生的物质。从 Cd 的完全有效利用的观点, 以循环利用为前提的 CdTe 太阳电池, 如果做得好, 还可以对环境保护做出贡献。

图 3 表示 CdTe 太阳电池的典型构造和制作方法。如图所示, CdTe 太阳电池是由玻璃基板/透明导电膜/n 型 CdS 窗层/p 型 CdTe 光吸收层/背面电极等构成的。这种结构是从基板侧入射光, 属于上衬底型。

利用 CSS 法制作的 CdTe 太阳能电池, 已达到超过 16% 的转换效率。由 NREL 发表的转换效率达 16.5% 的 CdTe 太阳电池, 开路电压 0.845V, 与同等程度禁带宽度的 GaAs 系太阳电池的开路电压 (1V 以上) 相比, 算是非常小的, 因此还有进一步改善的余地。为了改善开路电压, 需要提高 CdS 窗层及 CdTe 光吸收的膜层质量, 以抑制载流子的复合, 以及使 CdTe 光吸收层的受主密度增大等。另外, 曲线因子为 0.7551, 与从开路电压根据理论导出的曲线因子 (约 0.8) 相比, 是相当小的。这主要是由于串联电阻的影响所致, 因此, 有必要实现 CdTe 层的低电阻化并改善与背面电极的有效接触。

碲化镉 (CdTe) 太阳电池因低价格的明显优势, 估计今后其产量会进一步扩大。但从另一方面讲, 稀缺元素碲 (Te) 原料的供应不足问题会随之显现。今后, 随着生产规模的扩大, 除了原料的增产之外, 藉由 CdTe 的薄膜化等节约原料的用量等技术开发也是必须要解决的问题。

3. CIGS 太阳电池

CIS 是由 Cu (铜)、In (铟)、Se (硒) 三种元素, CIGS 是在 CIS 中增加 Ga (镓) 由四种元素构成的化合物半导体。CIS/CIGS 太阳电池是以 CIS 或 CIGS 作

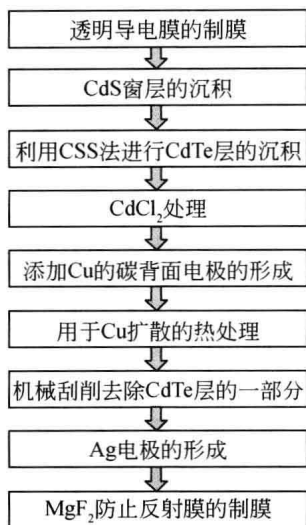
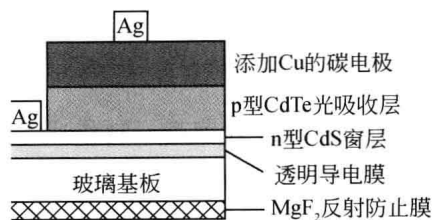


图 3 CdTe 太阳电池的典型构造和制作方法

光吸收层的非硅系薄膜太阳能电池。由于用很少的材料就能获得高效率，因此被认为是优秀的太阳电池。日本的昭和壳牌石油、本田太阳能技术、德国 Wuerth Solar 等企业从 2007 年开始实现年产超过 10MW 的量产。CIS/CIGS 作为下一代的薄膜太阳能电池而逐渐汇聚人们的目光。

典型 CIGS 太阳能电池的结构和特长如图 4 所示。首先，在青板玻璃（石灰苏打玻璃）基板上，利用溅镀法沉积 Mo（钼）背面电极，接着在其上面制作 CIGS 光吸收层。而后利用化学析出法（chemical bath deposition, CBD）形成缓冲层（buffer），并在其上制作 ZnO（氧化锌）窗层。最后形成金属电极。通过各种方法，制作各种不同种类的膜层，最终形成太阳电池。为了制作高效率的太阳电池，必须确保上述各种膜层质量。

在各种薄膜太阳能电池中，CIGS 太阳能电池的转换效率非常高，小面积电池片的最高效率已实现 20.0%，而且 CIGS 对可见光区域光的吸收系数 α 很大，大约在 10^5 cm^{-1} 。即使厚度为 $2\mu\text{m}$ 上下的薄膜也可能充分地吸收太阳光。

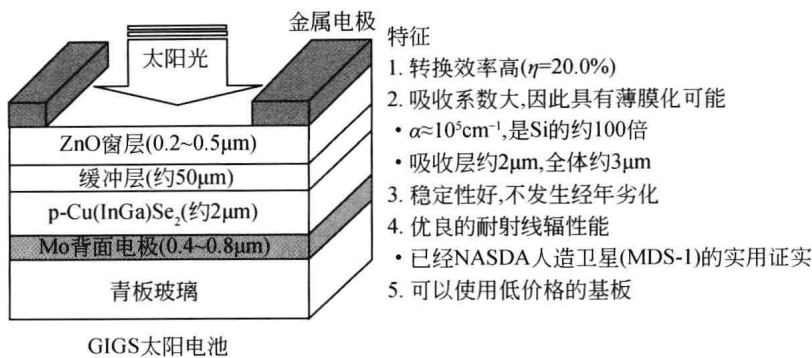


图 4 GIGS 太阳电池的结构和特征

4. 超高效率多串结Ⅲ-V族化合物半导体太阳电池

砷化镓 (GaAs) 及磷化铟 (InP) 等Ⅲ-V族化合物半导体太阳电池, 作为宇宙用太阳电池早已达到实用化。这是因为这些材料从光电转换效率讲, 具有最佳的禁带间隙能量, 一般在 1.5eV 左右, 特别是具有极优良的耐射线辐照性能, 而且利用Ⅲ-V族化合物半导体的 InGaP/InGaAs/Ge 3 串结构造的太阳电池集光工作模式下, 转换效率已实现 41.4%, 若进一步采用 4 串结、5 串结等更高串结结构, 还有可能实现 50% 以上的超高转换效率。

目前作为主流的是晶硅太阳能电池, 二传手是薄膜太阳电池。三传手可能是作为地面用而备受期待的, 含集光太阳电池在内的超高效率多串结Ⅲ-V族化合物半导体太阳电池。

图 5 表示太阳光谱和藉由Ⅲ-V族化合物半导体构成的多串结太阳电池 (图中以 3 串结为例) 实现广带域受光的示意图。例如, InGaP 顶部电池覆盖 300~650nm 波长, InGaAs 中部电池覆盖 650~850nm 波长, Ge 底部电池覆盖 850~1800nm 波长, 达到广带域受光效果。另外, 为了将多个电池进行光学损失和电气损失更小的连接, 其间还需采用隧道结。

图 6 表示多串结太阳电池的理论效率与串结数的相关性。3 串结、4 串结非集光系的转换效率可期待达到 42%、46%, 而集光系可期待达到 52%、55%。太阳电池的集光模式与非集光模式相比, 按绝对效率计, 可提高 7%~12%, 因此颇具吸引力。

表 2 列出实现超高效率多串结太阳电池的关键技术。作为重要的关键技术, 除了①顶部电池材料的选定和高品质化, ②低电阻损失、低光学损失的隧道结之外, 还包括③基板, ④点阵常数匹配, ⑤载流子封闭, ⑥光封闭等。

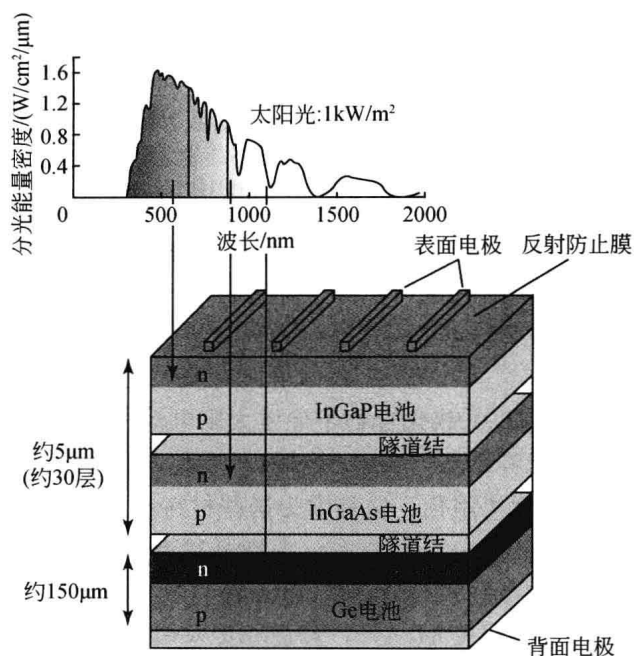


图 5 太阳光谱和藉由Ⅲ-V族化合物半导体构成的多串结太阳能电池
(以 3 串结为例) 实现广带域受光的示意图

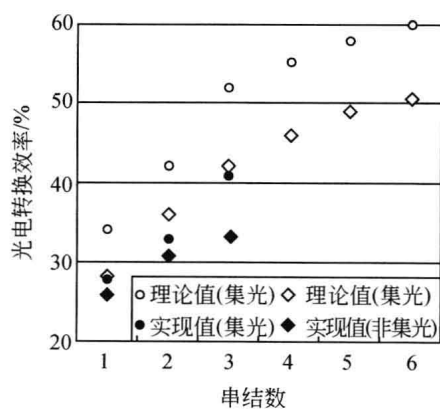


图 6 藉由太阳能电池的多串结化实现高效率化的可能性
(理论转换效率和目前已达到的实现效率)

表 2 实现超高效率多串结太阳能电池的关键技术

关键技术	过去	现在	未来
顶部电池材料	AlGaAs	InGaP	AlInGaP
第 3 层材料	无	Ge	InGaAsN 等
基板	GaAs	Ge	Si
隧道结	DH 结构 GaAs	DH 结构 InGaP	DH 结构 (Al) GaAs
晶格匹配	GaAs 中间电池	InGaAs 中间电池	(In) GaAs 中间电池
载流子封闭	InGaP-BSF	AlInP-BSF	宽能隙-BSF (QDs)
光封闭	无	无	Bragg 反射等
其他		(倒金字塔形凹凸) 薄层	倒金字塔形凹凸薄层

5. 有机薄膜型太阳电池

所谓有机薄膜太阳电池，是指利用有机半导体的太阳电池。尽管目前转换效率低，只有 5%左右，故仍未达到实用化，但由于具有轻量、挠性等硅系所不具备的特性。作为下一代太阳电池被寄以厚望。从另一方面讲，在可靠性方面，至今仍未获得实质性突破。

有机太阳电池可分为高分子系、低分子系有机薄膜太阳电池（OTFSC）和色素增感太阳电池（DSC）等三大类，但若从色素或共轭分子吸收光进行光电变换的起始点看，三者却是相同的，故上述每一类都可称为有机太阳电池。

有机系太阳电池具有下述特征：

（1）轻量、薄形、外形可变。作为有机系的第一特征，它属于薄膜型太阳电池。由于可实现具有精致多层结构的膜片状太阳电池，可期待大面积化。如此，即使不像结晶硅太阳电池那样，需要用重的装置设置于屋顶之上，由于采用的是几毫米厚的膜片，藉由提供迄今还未曾考虑形状的各式各样的电池，期待在以外壁（包括车、船外壳等）、窗户等建材开始的新的用途方面有所作为。

（2）不受资源制约，环境友好。不使用 As、Cd、Te、In 等资源稀少，且极有可能增加环境负荷的元素。寿命终结太阳电池的废弃成本几乎为零。

（3）制作耗能低，便于量产。用于通常印刷的 roll to roll 连续性制程可以移植用来制作有机系太阳电池。不需要真空，制程简易，生产效率高。特别是耗能低，作为能量回收期（energy payback time，EPT）短的太阳电池而备受期待。

（4）产品设计自由度高，适应面广。纤维制品、窗用建材、车船外壳等无机系太阳电池所不能的各种用途均可胜任，可满足多样性用途要求。

对于有机薄膜型太阳电池来说，最重要的课题是化学，在由各种不同材料组合而成的器件中，如何最佳组合，实现最高效率和更长寿命就显得越发重要。

单结电池理论转换效率的极限，预测为 12%~15%。要实现比此更高的效率，必须串结化。除了现已报道的 2 串结之外，今后 3 串结以上的串结化是重要的开发课题。

关于耐久性，也已经开始超过一年的室外暴露的长期评价，正在进行劣化机制的分析和评价。

有机薄膜太阳电池，在转换效率、耐久性等方面还未达到实用化水平，但有人以一年间生产量为 100MW，转换效率 10% 为前提，估算了组件制造价格。分材料费、设备费、人工费、光热费等进行试算的结果，一年间 GW 级的单位造价有可能实现每瓦 75 日元的水平。如果达到 10% 的转换效率，则有可能实现 14 日元/(kW·h) 的电价。随着有机薄膜太阳电池的研究开发进展，人们确信 2015 年转换的效率能达到 10%，因此，NEDO 在 2007 年确定的 PV2030 路线图目标，于 2009 年改为可提前 5 年实现，路线图名称也改为 PV2030 plus (图 7)。

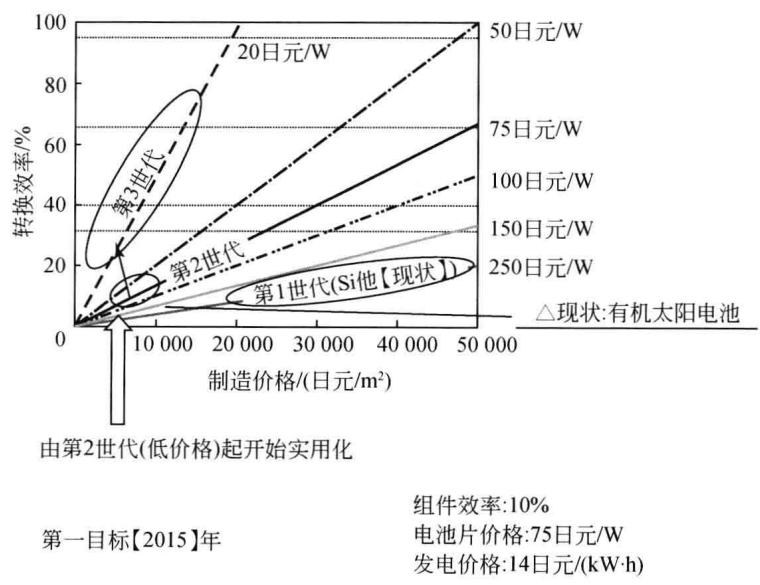


图 7 电力用有机薄膜太阳电池的开发目标

6. 色素增感（染料敏化）太阳电池

色素增感（染料敏化）太阳电池，由于具有可低价格制作的可能性，作为下一代太阳电池的候补之一而备受期待，目前国内外面向实用化的研究开发在活跃地进行中。

这种色素增感太阳电池是由氧化物半导体与吸收可见光的色素分子组合而成

的电极，与采用含有氧化还原（redox）离子的电解液而构成的湿式（近年也在开发干式）太阳电池。

早在 20 世纪 60 年代末到 70 年代初就开始了色素增感太阳电池的研究，但受当时材料的种类及结构限制，离实用化还很遥远。此后，于 1991 年，瑞士的研究团队开发出作为增感剂而使用的，新的钌（Ru）络合物，由以此增感的氧化钛纳米晶形成薄膜电极，与含有碘氧化还原（redox）离子的电解液一起，构成太阳电池，并由此获得 7% 当时最高的光电转换效率。受此激励，色素增感太阳电池再次引起世界关注。

目前，色素增感太阳电池公认的效率为 10.4%，已达到甚至超过非晶硅太阳电池片的水平，而且由于制程中不需要真空，因此作为制程简单、低价格的太阳电池而备受期待。

图 8、图 9 分别表示色素增感太阳电池的构造及发电机制。作为氧化物半导体电极的材料，通常采用粒径为 10~20nm 的氧化钛（TiO₂）纳米颗粒，将其积层成纳米多孔（porous）状的电极使用（二氧化钛薄膜电极的厚度通常为 10~15μm）。作为吸收光的增感剂色素吸附于二氧化钛电极的表面。

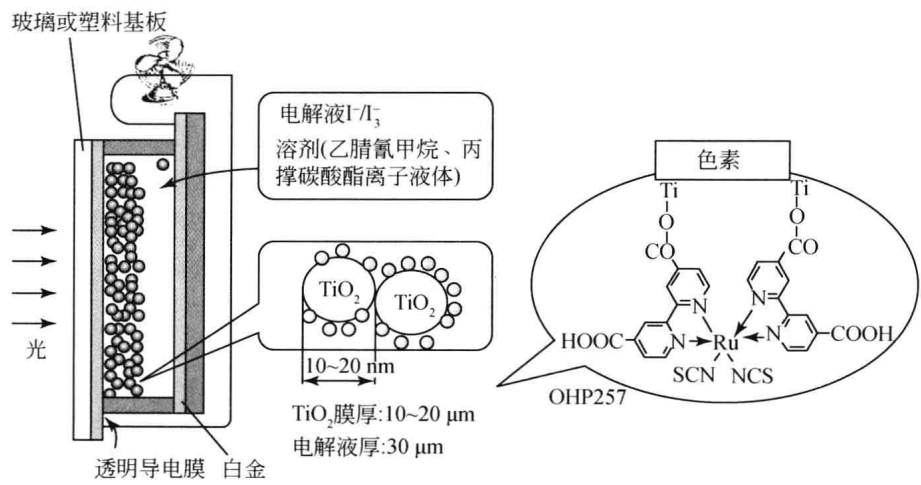


图 8 色素增感太阳电池的构造

为了进一步提高转换效率及耐久性，目前正在进行各种各样的研究开发。例如，作为色素增感太阳电池的电极材料，除了二氧化钛之外，人们正在探讨氧化锌、二氧化锡等其他的氧化物半导体材料。有研究报道，电极形状也不是采用纳米粒子，而是采用管状及棒状的二氧化钛及氧化锌电极。采用纳米管及纳米棒的氧化物，可以提高作为载流子的电子的迁移率，期待获得高效率的可能性。但从现状看，使用二氧化钛以外的材料，即使采用纳米管及纳米棒电极，但均未超过

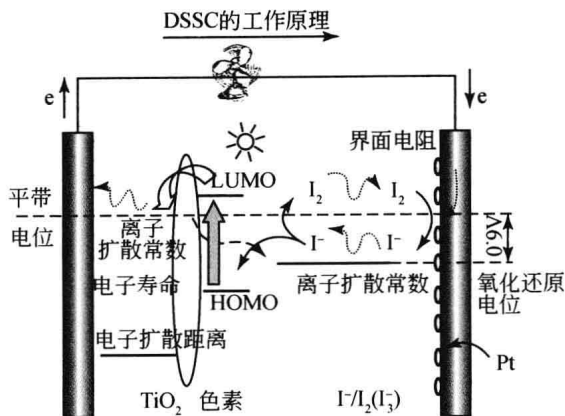


图9 色素增感太阳电池的构造及发电机制

采用二氧化钛粒子作电极的太阳电池的转换效率。

为了提高耐久性，人们正在探讨将电解液做成凝胶状，即采用拟固体化乃至固体化的方法。进一步，代替碘离子的氧化还原离子的研究也在进行之中。从现状看，仍未获得超越采用碘氧化还原电解液太阳电池的，但期待今后会取得进展。

进一步，以高效率化为目标的串结型色素增感太阳电池的研究也在进行之中。这是藉由将吸收波长不同的材料及太阳电池积层，以提高转换效率的技术，早已在部分硅及化合物半导体太阳电池中成功使用。对于色素增感太阳电池，也在探讨将采用吸收波长不同的色素的电池（片）积层，以制作串结太阳电池的方案，而且研究了在同一个电池（片）中采用不同色素的串结太阳电池，并有取得高转换效率的报道。期待今后取得更大进展。

田民波

清华大学材料科学与工程系

第 2 版序言

“那里有光!” 1968 年 12 月, 当阿波罗 8 号在绕月球运转时, 宇航员第一次在寒冷的空间里, 看到了翠绿色的地球, 这是最初用人类文化表达最高技术的相关文献。这是一个对动态科学和工程非常自信的时刻, 几乎可以骄傲地说: 核电站的前景“便宜得无需装表计费”, 还有超音速客机、半导体器件、远程通信、新材料, 当然也包括硅太阳能电池的出现和最早的应用等。我们关于地球蓝色的、光与水的运动星体的想象, 成了一个技术成就的象征, 但更多的是传达了一种认识, 即地球的脆弱和在原本空洞的宇宙中的孤立。当时, 我们有压倒性的信心, 藉由人类开创的新技术, 依靠能力、应用和资源, 任何事情都是有可能的。现在, 相反地, 也许一定程度上是基于对地球新的认识, 我们有一种悲观意识, 即大自然是人类无法控制的, 甚至完全蔑视我们的努力。正如福岛的地震和海啸, 或新奥尔良由飓风导致的洪水, 大自然可以摧毁我们最好的工程成就。在能源危机的背景下, 用整体的“系统”眼光看我们的世界, 我们的技术是破坏地球平衡的一个不可避免的结果, 该平衡使我们在蓝色星球上舒适地居住。地球的图像从荒芜的月球上传回, 这不仅作为环保运动的图标, 而且对保护我们自己、我们的技术、经济和社会永久地与地球协调提出了挑战。通过光电、光热系统, 也许遗传工程的光有机体, 并在每一个环节施加人类的智慧, 太阳光和太阳能资源的开发一定会为实现这一目标做出重要贡献。在 2007 年, 超过 80% 的主要商业能源的需求仍然由可燃矿物燃料提供, 这是对挑战的衡量。除了水电和核能, 其他真正意义上的地球上可用的能源技术, 特别是要消除能够诱发气候失衡的排放量, 在这个时候只有微小的贡献。为了决定性地改变这种状况, 需要的承诺可与阿波罗计划相比。这是一项艰巨的任务。

同时, 太阳能光伏发电正是提供所需要的可持续能源系统的一个选项, 这种可能性是存在的。照射到地球上的太阳光表示为连续的功率输出约为 173PW 或 $173 \times 10^{15} \text{ W}$; 而 1PW·h 的能量即高于全球每年的能源需求。但是, 在任何给定的位置, 它是一个低强度的和间歇的能源。必须提供大面积、低成本的系统用于入射太阳能的采集和转换; 当太阳能电力资源成为总装机容量的一个重要部分, 存储问题最终也将成为关键。

《Practical Handbook of Photovoltaics》的修订是一个机会, 可望对了解和推广光伏发电技术做出贡献。作为本版的编辑, 我首先要感谢 Tom Markvart 和 Luis Castañer 在编辑第 1 版时开创性的工作。同时, 我要感谢本书的所有作者, 尤其是那些负责新的或大量修订章节的作者。能与这些专家, 在光伏科学和工程

基础开创方面做出了贡献的富有经验的研究人员，建立了光伏世界的一些著名的人物和许多当代的工艺行家互动，我倍感荣幸，正是通过他们的研究努力为未来做出贡献。我想提及参与了本手册编辑工作的两个人：Peter Landsberg 和 Roger Van Overstraaeten，可悲的是，他们已经远离我们而去，但他们都值得尊敬与铭记，他们的工作仍然是有意义的。我也要感谢 Elsevier 出版公司的团队，没有他们，这项工作将不能得见天日，尤其是 Jill Leonard, Tiffany Gasbarrini 和 Meredith Benson。

因为形势发展瞬息万变，因此关于光伏产业目前的商业状况没有单独作为一章。市场和总装机的光伏发电能力连续按指数增长，自 2000 年以来，年增长率超过 40%。但是，确实如此，附录中汇总了对全行业的调查结果。这里要特别答谢意大利伊斯普拉欧洲委员会联合研究中心 Arnulf 博士的工作，因为他提供了最新的统计。光伏发电是目前增长最快的能源技术，累积装机容量从 1992 年的 100MW 增加到 2008 年的 14GW（国际能源机构数据，2010 年 10 月<http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf>）。为维持且如有可能最好加速这一进程，以保护我们的地球与在 40 年前从太空中看到的一样，这是科学、工程、经济和社会共同参与的具有历史性担当和重大意义的事业，呼吁光伏发电技术在这一事业中发挥重大作用。

1. J. McEvoy

Lausanne, Switzerland

2011

（田民波 译）